**ВАДИМ БУДНЯЕВ, ВАЛЕРИЙ ВЕРТЕГЕЛ,** Инжиниринговый центр изделий микро- и наноэлектроники СевГУ, engineering@sevsu.ru

# ИНТЕГРАЛЬНЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ С-ДИАПАЗОНА НА ОСНОВЕ 0,18-мкм SiGe БиКМОП-ТЕХНОЛОГИИ

В статье представлены результаты разработки интегрального малошумящего усилителя С-диапазона для сложно-функциональной монолитной интегральной схемы приемо-передающего модуля активной фазированной антенной решетки гражданского назначения. Разработана электрическая схема интегрального МШУ и проведено моделирование в системе автоматизированного проектирования Cadence IC Design с использованием PDK 0,18-мкм SiGe БиКМОП технологического процесса.

## ВВЕДЕНИЕ

Ключевым элементом приемного тракта любого приемо-передающего устройства является малошумящий усилитель (МШУ). Функцией МШУ является предварительное усиление слабых сигналов, наводимых в антенне, без существенного ухудшения отношения сигнал/шум. В частности, интегральный МШУ является необходимым функциональным узлом приемо-передающих модулей (ППМ) активных фазированных антенных решеток (АФАР), которые используются в системах радиолокации и радионавигации, радиоэлектронной борьбы, а также в телекоммуникационных системах различного назначения.

В статье приводятся результаты разработки электрической схемы и топологии интегрального малошумящего усилителя С-диапазона, предназначенного для сложнофункциональной монолитной интегральной схемы (МИС) ППМ АФАР, которая разрабатывается в рамках государственного задания № 8.3962.2017/ПЧ.

## ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА И ТОПОЛОГИЯ МШУ

Разработка электрической схемы и топологии МШУ проводилась в пакете прикладных программ Cadence IC Design с использованием библиотек моделей элементов технологического кремний-германиевого БиКМОП-процесса с проектной нормой 0,18 мкм. Разработанная схема МШУ показана на рисунке 1.

Транзистор VT1 включен по схеме с общей базой для обеспечения хорошего согласования входного импеданса первого каскада с сопротивлением 50 Ом в широкой полосе частот и обеспечивает необходимый коэффициент усиления по напряжению.

Использование каскодного усилителя на полевых транзисторах VT2 и VT3 позволило получить высокий коэффициент усиления по напряжению без сужения рабочей полосы частот благодаря уменьшению влияния эффекта Миллера. ФНЧ в цепи базы транзистора VT1 необходим для предотвращения попадания переменной составляющей напряжения на выход источника опорного напряжения (ИОН) [1], предназначенного для формирования напряжения смещения транзистора VT1. Напряжение смещения транзистора VT3 устанавливается на линейном участке вольтамперной характеристики, что позволяет в широком диапазоне напряжения смещения обеспечить линейность работы каскада. Для транзистора VT4 напряжение смещения установлено аналогично.

В качестве нагрузки второго каскада используется последовательная RL-цепь (элементы R4 и L1) для обеспечения высокого коэффициента усиления в широком диапазоне частот.

Разработанная топология малошумящего усилителя показана на рисунке 2. Занимаемая площадь — 0,12 мм$^2$ (без контактных площадок).

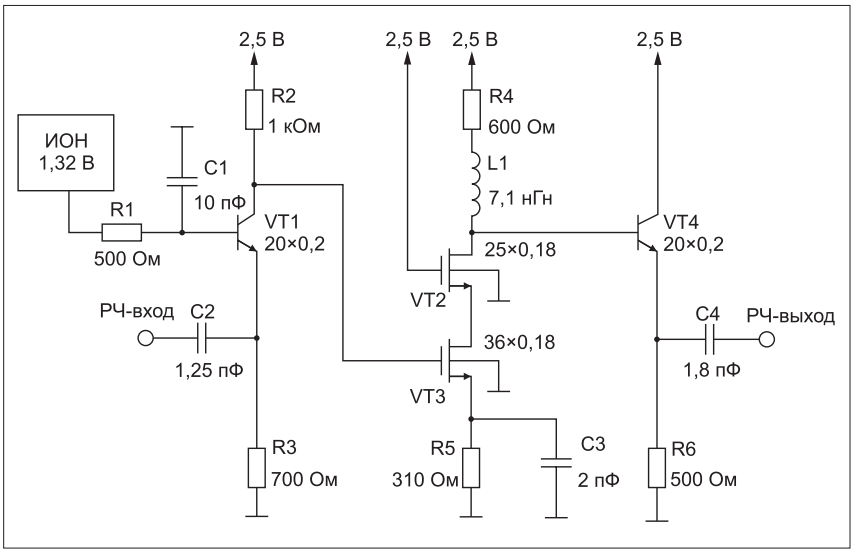


**Рис. 1.** Упрощенная схема МШУ

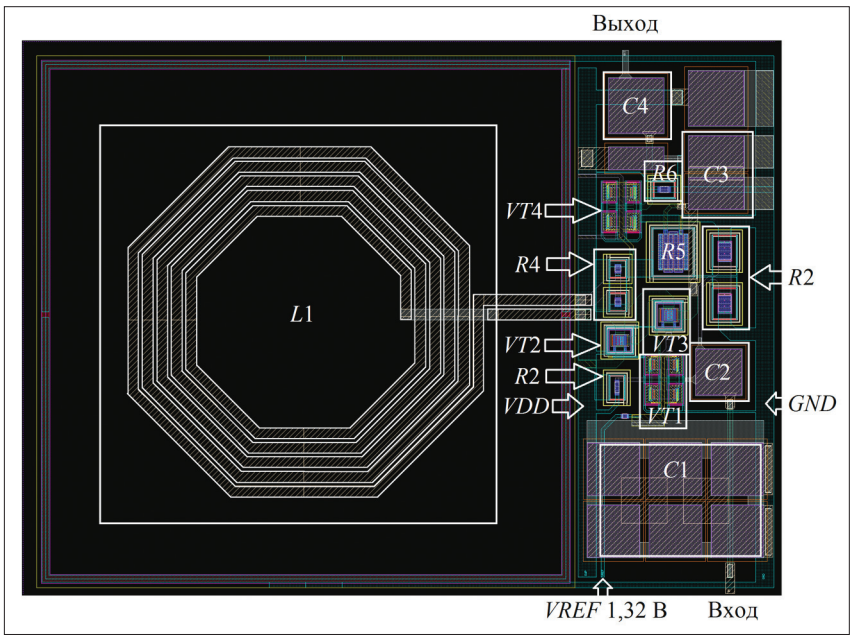


**Рис. 2.** Топология МШУ

## РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Проведено схемотехническое моделирование МШУ с учетом влияния паразитных элементов топологии. На рисунке 3 показаны основные зависимости малосигнальных параметров усилителя. Коэффициент усиления в рабочем диапазоне частот 3,4–7 ГГц составляет 20–21,8 дБ.

Входной импеданс схемы согласован с 50 Ом в рабочей полосе частот. Качество согласования оценивалось с помощью параметра $S_{11}$, величина которого не превышает –12,5 дБ.

Одной из характерных особенностей измерения коэффициента шума испытуемого устройства является его температура. Осмысленное сравнение величин коэффициента шума требует, чтобы измерения проводились при стандартной температуре 290 К (17 °С). В качестве часто упоминаемой причины, которая обусловила этот выбор, называется приблизительное равенство этой температуры и средней температуры приемной антенны, направленной через атмосферу на передающую антенну. Кроме того, спектральная плотность мощности $kT_0$ равномерна в полосе частот и равна $4{,}00 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц (–174 дБм/Гц) [2]. Значение коэффициента шума МШУ в диапазоне 3,4–7 ГГц при температуре 17 °С не превышает 4,9 дБ.

Влияние разброса технологических параметров элементов схемы МШУ на величину коэффициента шума оценивалось по результатам статистического анализа (метод Монте-Карло). Гистограмма, построенная в результате статистического моделирования, показана на рисунке 4.

Закон распределения коэффициента шума близок к нормальному, а его отклонение на уровне $3\sigma$ составляет 0,24 дБ. Сравнение основных параметров разработанного усилителя и МШУ, представленных в научных статьях из зарубежных периодических изданий, приведено в таблице.

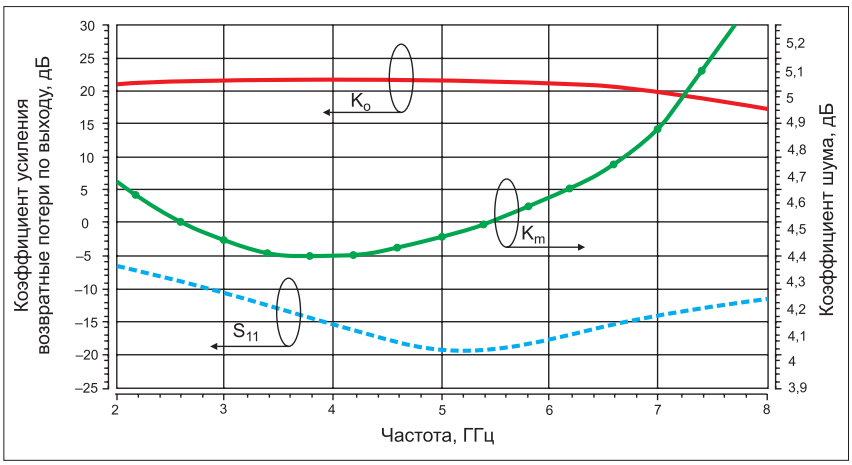


**Рис. 3.** Основные частотные зависимости разработанного МШУ

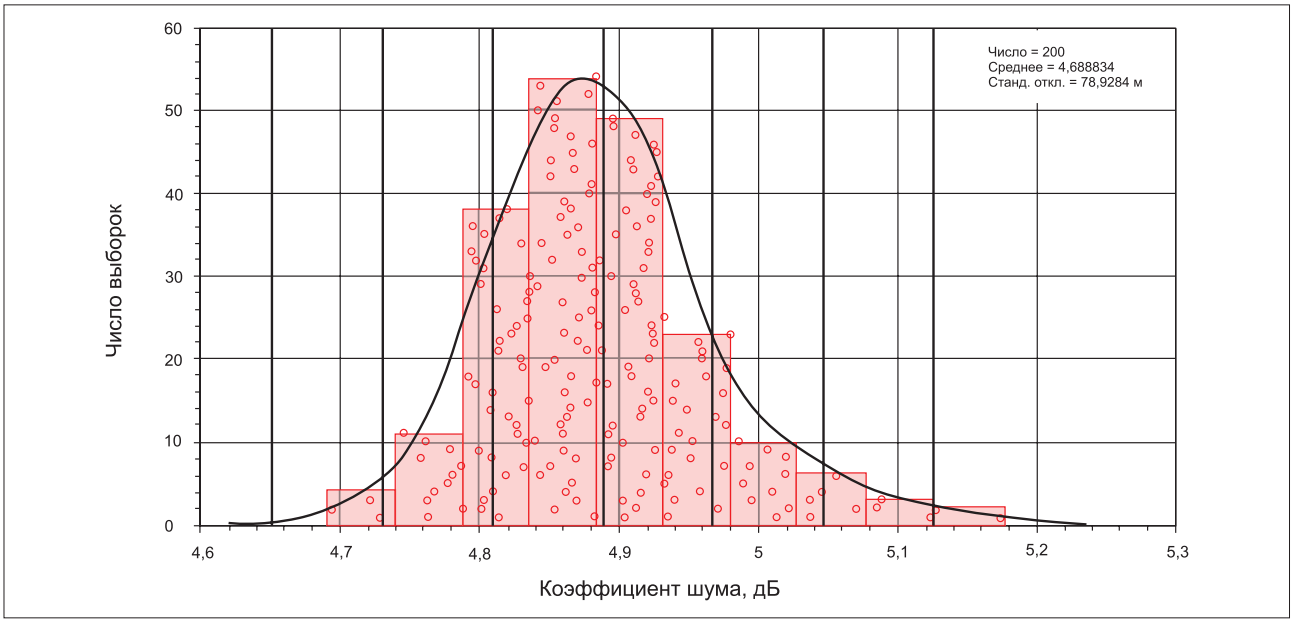


**Рис. 4.** Гистограмма распределения коэффициента шума

Таблица. **Сравнение основных параметров усилителей**

| Параметр | [3] | [4] | [5] | [6] | Эта работа |
|---|---|---|---|---|---|
| Технология | SiGe БиКМОП 0,18 мкм | КМОП 0,18 мкм | SiGe БиКМОП | КМОП 0,18 мкм | SiGe БиКМОП 0,18 мкм |
| Диапазон частот, ГГц | 3–10 | 3,1–10,6 | 3,1–10,6 | 1–5 | 3,4–7 |
| Коэффициент усиления, дБ | 21 | 9–10 | 23–23,5 | 11–13,7 | 20–21,8 |
| Коэффициент шума, дБ | 2,5–4,2 | 4–7 | 3–4 | 5–6,5 | 4,44–4,83 |
| $S_{11}$, дБ | <–10 | <–10 | <–6 | <–12 | <–12,5 |
| $IP_{1\,дБ}$, дБм | – | – | –19,5 | – | >–21,5 |
| IIP3, дБм | –5 | –8,8 | –10,5 | –9,8 | >–13,1 |
| Потребляемая мощность, мВт | 30 | 9 | 55 | 9 | 14 |
| Занимаемая площадь, $мм^2$ | 1,8 | 1,1 | 0,17 | 0,78 | 0,12 |

## ВЫВОДЫ

Создан интегральный малошумящий усилитель С-диапазона, предназначенный для применения в составе сложнофункциональной монолитной интегральной схемы приемо-передающего модуля активной фазированной антенной решетки, которая разрабатывается в рамках государственного задания № 8.3962.2017/ПЧ.

Проведено моделирование основных параметров МШУ с учетом паразитных элементов топологии. Разработанный МШУ в диапазоне частот 3,4–7 ГГц обеспечивает усиление 20–21,8 дБ, коэффициент шума менее 4,9 дБ. Возвратные потери по входу превышают 12,5 дБ. Потребляемая мощность: 14 мВт от источника питания 2,5 В. Точка децибельной компрессии по входу $IP_{1\,дБ}$ на центральной частоте составляет –20,5 дБм, точка пересечения интермодуляции 3-го порядка IIP3 по входу: не менее –13,1 дБм. Диапазон рабочих температур усилителя: –60…85 °С.

***Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (задание № 8.3962.2017/ПЧ). Шифр проекта 8.3962.2017/ПЧ.***

## ЛИТЕРАТУРА

*1. Будняев В. А. Интегральный источник опорного напряжения с широким диапазоном рабочих температур/Будняев В. А., Кравченко И. В., Снегур Д. А. Современные проблемы радиоэлектроники и телекоммуникаций «РТ-2016». Матер. докл. XII-й Межд. Молодежной науч.-техн. конф. РТ- 2016. Севастополь. 14–18 нояб. 2016 г. Севастополь: изд-во СевГУ. 2016.*

*2. Основы измерения коэффициента шума в радиочастотном и микроволновом диапазонах. Keysight Technologies//http://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5952–8255RURU.pdf.*

*3. Ismail A., Abidi A. A 3–10-GHz Low-Noise Amplifier with Wideband LC–Ladder Matching Network. IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2004. Vol. 39. No. 12.*

*4. Bevilacqua A., Niknejad A. An Ultrawideband CMOS Low-Noise Amplifier for 3.1–10.6-GHz Wireless Receivers. IEEE Journal of SolidState Circuits. 2004. Vol. 39. No. 12.*

*5. Dederer J., Trasser A. Compact SiGe HBT Low Noise Amplifiers for 3.1–10.6 GHz Ultra-Wideband Applications. University of Ulm.*

*6. Shen M., Tong T., Mikkelsen J., Jensen O. Design and Implementation of a 1–5 GHz UWB Low Noise Amplifier in 0.18 μm CMOS. Aalborg University. 2011.*